

СКОРОСТЬ СВЕТА В ВАКУУМЕ

Вопрос о значении скорости света в вакууме, вновь и вновь измеряемой в целом ряде лабораторий, продолжает привлекать к себе пристальное внимание. Об этом свидетельствует, например, обилие появившихся в течение 1951—1952 гг. критических сводок^{1—4}, а также обзоров^{5—11}, адресованных главным образом широкому кругу научных работников. Причину такого повышенного интереса следует видеть не только в том, что скорость света является одной из основных физических постоянных, но и в происходящем за последние годы радикальном пересмотре принятого значения этой величины. Сразу же следует отметить, что этот пересмотр связан не с обнаружением какой-нибудь ошибки в прежних работах, а с резким увеличением точности отдельных измерений. Бурное развитие экспериментальной техники, особенно техники микроволновых измерений, позволило к концу сороковых годов осуществить ряд измерений скорости света с точностью, на 1—2 порядка превышающей

точность предшествовавших измерений. При этом как измерительная методика, так и диапазоны частот, для которых осуществлялись измерения, оказались несравненно разнообразнее, чем ранее. Наряду с обычными измерениями скорости распространения волн видимого диапазона в воздухе, для определения скорости света были привлечены радиолокационные измерения, измерения резонансных частот в полых цилиндрических волноводах и др. методы. Два года назад мы уже имели возможность ознакомить читателей нашего журнала с методикой и первыми результатами таких измерений¹². Однако с тех пор появился ряд новых работ, заслуживающих внимания. Напомним вкратце суть дела.

Вплоть до конца сороковых годов считалось общепринятым значение скорости света в вакууме

$$c = 299\,776 \pm 4 \text{ км/сек},$$

полученное Берджем¹⁸ в результате тщательного анализа весьма многочисленных измерений, выполненных до 1941 г. Отличительной чертой этих данных было то, что погрешности отдельных измерений оказывались очень большими, и сравнительно скромная вероятная погрешность, указанная Берджем, являлась результатом статистической обработки огромного материала. Основным же результатом новейших измерений скорости света неожиданно оказалось не уменьшение вероятной ошибки, а существенное изменение самого значения (в среднем на 16 км/сек) далеко за пределы погрешности, указанной Берджем (см. ¹², а также таблицу I). Более поздние данные, опубликованные за истекшие два года, подтвердили и уточнили этот результат.

Наибольший интерес среди этих данных несомненно представляют результаты, полученные Ганzenом и Болом^{2, 10, 14}, Аслаксоном¹⁵ и Фрумом²³. Методика, примененная Ганzenом и Болом^{10, 11}, в общем, аналогична описанной в ¹² методике Эссена: измерялась резонансная частота в полом цилиндрическом резонаторе, из которого был эвакуирован воздух. Некоторое отличие в деталях проведения эксперимента и определения аппаратурных постоянных представляет интерес постольку, поскольку сопоставление результатов Эссена с результатами Ганzenа и Бола позволяет судить об абсолютной погрешности метода. В этой связи отметим, что оценка Эсеном предельной абсолютной погрешности в $\pm 1 \text{ км/сек}$ *) оказалась излишне оптимистичной. Значение, полученное Ганzenом и Болом, таково:

$$c = 299\,789,3 \pm 0,4 \text{ км/сек}.$$

Подробности опытов Ганzenа и Бола пока не опубликованы, однако их измерения, по видимому, отличаются исключительной тщательностью. Так, Бирдин и Ваттс², критически рассматривая данные различных авторов, придают им статистический вес, в 14 раз больший, чем данным Эссена, и в 156 раз больший, чем значению, полученному Дорсеем из критического анализа всех опытов, сделанных до 1941 г. **).

*) Приведенные в ¹² значения возможных погрешностей в измерениях Эссена и Гордон-Смайса ($\pm 9 \text{ км/сек}$) и Эссена ($\pm 3 \text{ км/сек}$) были затем уменьшены Эсеном^{3, 10, 15} до ± 3 и $\pm 1 \text{ км/сек}$, соответственно, в результате учета некоторых первоначально упущенных факторов. Эта ошибка рассматривается Эсеном не как вероятная, а как предельная возможная.

**) Значение, полученное Дорсеем, несколько отличается от значения, полученного Берджем — см. таблицу III.

Измерения Аслаксона¹⁵ являются прямым продолжением его более ранних работ¹⁷ по радиогеедезии (см. 13). Однако повторение измерений с более совершенной аппаратурой и пересмотр данных о показателе преломления воздуха для микрорадиоволн (для сухого воздуха при 760 мм рт. ст. и 0° С принимались $n = 1,000\,2876$) привели его к значению

$$c = 299\,794,2 \pm 1,4 \text{ км/сек},$$

заметно отличающемуся от полученного ранее (см. таблицу II).

В опытах Фрума²³ измерялась фазовая скорость микрорадиоволн в воздухе. Значение скорости получалось в результате одновременного определения частоты и длины волны излучения. Частота находилась путём сравнения с высшими гармониками стандартного кварцевого осциллятора. Для измерения длины волны было использовано устройство, аналогичное интерферометру Майкельсона. Излучение стабилизированного клистрона (24 000 Мгц) разделительным устройством направлялось в два плеча интерферометра. Одно из плеч (короткое) оставалось неизменным. Второе же представляло собой волновод, выводивший излучение в очень большую комнату, в которой (на расстоянии до 21,5 м) находилось металлическое зеркало, отражавшее излучение обратно в интерферометр. Перемещение зеркала вдоль луча изменяло разность хода интерферирующих волн и, следовательно, интенсивность излучения, попадающего на детектор. Положения зеркала, соответствовавшие минимуму показаний детектора, удавалось фиксировать с точностью до $\pm 3 \mu$. Поскольку полное смещение зеркала могло достигать 162 см (около 260 длин волн), постольку создавалась возможность определения длины волны с точностью до $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ измеряемой величины. Наиболее существенные погрешности происходили вследствие дифракционных явлений в интерферометре (они исключались путём варьирования среднего расстояния до зеркала) и наличия эхо, создаваемого неподвижными предметами, расположенными в той же комнате, что и зеркало. Полученные результаты пересчитывались к вакууму, исходя из имеющихся данных о показателе преломления воздуха и водяных паров для использованного интервала частот.

Окончательное значение, полученное Фрумом, таково:

$$c = 299\,792,6 \pm 0,7 \text{ км/сек},$$

причём указанные пределы погрешности учитывают как случайные ошибки, так и сделанную авторами оценку возможной систематической погрешности.

Аналогичный по идее, но совершенно иной по выполнению метод был использован Ронком и сотрудниками²⁴. Как известно, вращательные уровни энергии двуатомной или многоатомной линейной молекулы определяются соотношением $\nu = BJ(J+1) - DJ^2(J+1)^3 + \dots$, где ν — частота, соответствующая переходу с основного уровня на данный, J — вращательное квантовое число, $B = \frac{h}{8\pi^2 I}$ и I — момент инерции для данного колебательного состояния. Методы микроволновой абсорбционной спектроскопии позволяют непосредственно определять значение частоты ν , соответствующей переходу $0 \rightarrow 1$ для ряда молекул (при этом $\nu = 2B - 4D$). Вместе с тем значения B и D могут быть независимо определены из анализа вращательной структуры полос поглощения в инфракрасной области спектра. Однако в последнем случае непосредственно измеряются не частоты, а длины волн, и значения B и D получаются выраженными в обратных сантиметрах. Таким образом отношение значения B , полученного микроволновыми методами, к значению той же величины, полученному спектроскопически, равно скорости света в вакууме.

Ронк и сотрудники осуществили оптические измерения вращательной структуры для двух полос HCN. Пары HCN заполняли трубу длиной.

8 метров, под давлением от 35 до 70 мм рт. ст., причём луч света, прежде чем попасть в спектрограф, пересекал эту трубу несколько раз. Спектрограф имел решётку 15 000 штрихов на дюйм длиной 6,5 дюймов. Фокусное расстояние составляло 10 метров. Спектр первого порядка подвергался дальнейшему анализу с помощью интерферометра Фабри-Перо толщиной 21,35 мм.

В результате авторами были получены следующие значения:

$$B = 1,47830 \pm 0,00025 \text{ см}^{-1}, \quad D = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}.$$

Поскольку имевшиеся в литературе данные микроволновых измерений этих величин не обладали достаточной точностью, такие измерения были осуществлены заново Тоунесом с сотрудниками²⁵, причём было получено значение:

$$B = 44315,9 \pm 0,25 \text{ Мгц}.$$

Из сопоставления указанных значений B , для скорости света в вакууме получается:

$$c = 299\,776 \pm 7 \text{ км/сек}.$$

Авторы указывают, что имеются возможности дальнейшего уточнения результата.

Значительно меньший интерес представляют измерения Хаустона¹⁸ и Мак Кинли¹⁹. Оба автора определяли скорость распространения света в воздухе визуально, используя несколько видоизменённую методику Физо.

Мак Кинли для модуляции светового пучка использовал вместо ячейки Керра эффект вращения плоскости поляризации света в пластинке кварца под действием приложенного к пластинке электрического поля (частота модуляции 8 Мгц). Результат, полученный им, таков:

$$c = 299\,780 \pm 70 \text{ км/сек}.$$

Методика Хаустона более оригинальна. Пучок света пропусклся через пластинку пьезокварца, в которой возбуждалась стоячая ультразвуковая волна (частота 115 Мгц) и модуляция осуществлялась путём использования зависимости интенсивности диффрактированного пучка первого порядка (угол отклонения 35') от фазы ультразвуковых колебаний. Полученное им значение:

$$c = 299\,782 \pm 9 \text{ км/сек}.$$

Как видно, последние три значения ближе к значению Берджа, чем к результатам других более поздних измерений, а погрешность измерений значительно больше. Эти работы (особенно работы Ронка и Хаустона) следует рассматривать, однако, не столько как попытки уточнить значение скорости света, сколько с точки зрения развития методов измерения этой величины.

Наконец, нельзя не упомянуть о двух работах, посвящённых измерению скорости движения γ -квантов в воздухе^{20, 21}. Поскольку методика этих измерений была уже описана в нашем журнале, мы на ней останавливаться не станем. Отметим только, что в обоих случаях точность измерений весьма мала — всего около 1%, т. е. близка к точности наиболее ранних измерений, осуществлённых другими методами (кроме микроволновых; см. таблицу 1). Однако эти работы представляют интерес, поскольку они расширяют диапазон частот, охваченных прямыми измерениями. В самом деле, в настоящее время уже имеются данные, относящиеся к квазистатическому полю (измерения отношения электромагнитных единиц к электростатическим), к коротким радиоволнам ($\nu \sim 5 - 75 \text{ Мгц}$), к микроволновому диапазону ($\nu \sim 220 - 10\,000 \text{ Мгц}$), к видимому свету ($\nu \sim 10^8 \text{ Мгц}$) и к γ -излучению ($\nu \sim 10^{18} - 1 \text{ Мгц}$).

Таблица I

Результаты основных измерений скорости света в вакууме, выполненных до 1952 г. *)

1. По отношению эл.-стат. ед. к эл.-магн. Квазистационарное поле.

Год	Автор	(км/сек)	Пределы погрешности (км/сек)
1857	Вебер и Кольрауш	310 800	—
1868	Максвелл	284 300	—
1869	В. Томсон и Кинг	280 900	—
1874	Мак Кичан	289 700	—
1879	Аиртон и Перри	296 100	—
1880	Шида	295 600	—
1883	Дж. Дж. Томсон	296 400	—
1884	Клеменсис	302 000	—
1888	Гимштедт	300 660	—
1889	В. Томсон	300 500	—
1889	Роза	300 090	200
1890	Дж. Дж. Томсон и Сирл	299 690	—
1891	Пеллат	301 010	—
1892	Абрагам	299 220	—
1897	Гурмуцеску	300 190	—
1898	Перо и Фабри	299 870	—
1899	Лодж и Глазбрук	301 000	—
1906	Роза и Дорсей (исправлено Берджем в 1934 г.)	299 781	10

*) Некоторые из результатов измерений позднее подвергались исправлению с учётом новых значений других констант, использованных авторами при определении c .

2. Скорость распространения в свободном пространстве

Год	Автор	Частота излуче- ния (Мгц)	Пример- ное расстоя- ние (л)	Частота модуля- ции (Мгц)	Метод	c (км/сек)	Пределы погреш- ности (км/сек)
А. Видимый свет							
1676	Рёмер	10^8	$3 \cdot 10^{11}$	—	Затмение спутников Юпитера	215 000 *)	—
1728	Брадлей	10^8	—	—	Абберрация звёзд	300 000	—
1849	Физо	10^8	$9 \cdot 10^8$	0,009	Модуляция вращ. колесом	315 300	500
1862	Фуко	10^8	20	—	Отклонение луча вращ. зеркалом	298 100	500
1874	Корню и Хельмерт	10^8	$2,3 \cdot 10^4$	0,05	Модуляция вращ. колесом	300 400	200
1879	Майкельсон	10^8	700	—	Отклонение луча вращ. зеркалом	299 910	50
1882	Ньюкомб	10^8	$3,7 \cdot 10^3$	—	То же	299 860	30
1882	Майкельсон	10^8	—	—	" "	292 850	60
1891	Ньюкомб	10^8	—	—	" "	299 810	50
1902	Перротен	10^8	$4,6 \cdot 10^4$	—	Модуляция вращ. колесом	299 880	80
1902	Майкельсон	10^8	—	—	Отклонение луча вращ. зеркалом	299 890	60
1924	Майкельсон	10^8	$3,5 \cdot 10^4$	0,004	То же	299 802	30

*) По современным измерениям $300\,870 \pm 100$ км/сек²³.

Продолжение табл. I

Год	Автор	Частота излуче- ния (Мгц)	Пример- ное расстоя- ние (м)	Частота модуля- ции (Мгц)	Метод	c (км/сек)	Пределы погреш- ности (км/сек)
1926	Майкельсон	10^8	$3,5 \cdot 10^4$	0,004	Отклонение луча вращ. зеркалом	299 796	4
1928	Каролус и Миттельштадт . . .	10^8	200	5	Модуляция ячейкой Керра	299 786	20
1935	Майкельсон, Пиз и Пирсон . .	10^8	$1,6 \cdot 10^3$	0,02	Отклонение луча вращ. зеркалом	299 774	11
1937	Андерсон	10^8	170	19	Модуляция ячейкой Керра; фотоэлемент	299 771	15
1940	Хюттель	10^8	80	10	То же	299 768	10
1941	Андерсон	10^8	170	190	" "	299 776	14
1949	Бергшtrand (испр. в 1950 г.) .	10^8	$9 \cdot 10^3$	8	" "	299 793	2
1949	Хаустон	10^8	78	100	Пьезокварцевый модулятор; визу- ально	299 782	9
1950	Бергшtrand	10^8	$7 \cdot 10^3$	8,33	Модуляция ячейкой Керра; фотоэлемент	299 793,1	0,25
1950	Мак Кинан	10^8	20	8	Электрооптические явления в кварце; визуально	299 780	70
Б. Микрорадиоволны							
1947	Смайс, Франклин и Уайтинг	50	130 000	—	Радиолокация	299 786	50
1947	Джонс	3000	70 000	—		299 782	25
1949	Аслаксон	300	300 000	—		299 792	2,4
1949	Джонс и Корнфорд	3000	150 000	—		299 783	25
1951	Аслаксон	220—300	500 000	—		299 794,2	1,4

Год	Автор	Частота излучения (Мгц)	Примерное расстояние (м)	Метод	c (км/сек)	Пределы погрешности (км/сек)
В. γ -излучение						
1951	Клеянд и Джастрем	10^{13}	от 2 до 35	Время пролёта кванта между двумя счётчиками	298 300	1500
1951	Люкки и Вейль . . .	10^{16}	до 13	Запад. совпад. при счёте электронов и тормозных γ -квантов в функции расстояния счётчиков	297 400	3000
3. По скорости распространения в волноводе						
Год	Автор	Частота излучения (Мгц)	c (км/сек)	Пределы погрешности (км/сек)		
А. Схема Лехера. Короткие радиоволны						
1891	Блондло	10	от 295 000 до 305 200	—		
1911	Трубридж и Дуан	5	от 292 000 до 303 000	—		
1923	Мерсье	75	299 782	30		
Б. Полый резонатор. Микрорадиоволны						
1947	Эссен и Гордон-Смайк	3 000	299 792	3		
1950	Эссен	10 000	299 792,5	1		
1950	Ганзен и Бол	3 000	299 789,3	0,4		
4. По произведению частоты на длину волны						
Год	Автор	Частота излучения (Мгц)	Метод	c (км/сек)	Пределы погрешности (км, сек)	
1952	Фрум	24 000	Интерферометр.	299 792,6	0,7	
1952	{ Ронк и др. Тоунес и др.	Частота по микроволн. спектрам; длина волны по инфракрасным спектрам	Спектры поглощения	299 776	7	

Таким образом, измерения охватывают (с небольшими пропусками) интервал частот от нуля до 10^{22} гц. Как и следовало ожидать, нет никаких оснований сомневаться в отсутствии дисперсии скорости света в вакууме во всём этом огромном интервале частот. Результаты основных измерений скорости света, выполненных до 1952 г., сведены в таблице I.

Укажем также на появившееся недавно подробное описание измерений Бергштранда²⁰, результаты которых опубликованы ранее (см. ¹³).

В таблице II приводятся результаты наиболее тщательных измерений, выполненных после 1941 г. Наконец, таблица III содержит наиболее вероятные значения скорости света, полученные разными авторами в результате критического анализа экспериментальных данных. При рассмотрении этой таблицы бросается в глаза любопытное обстоятельство: дважды (между 1929 и 1934 и между 1948 и 1951 гг.) принятое наиболее вероятное значение испытывало изменения, далеко выходящие за пределы вероятной погрешности. Точно такая же картина выявляется при рассмотрении таблицы II — различия между данными разных авторов

Таблица II

Результаты наиболее тщательных новейших измерений скорости света в вакууме

Год	Автор	c (км/сек)
1947	Эссен и Гордон-Смайк	299 792±3
1949	Бергштранд	299 793±2
1949	Аслаксон	299 792±2,4
1950	Эссен	299 792,5±1
1950	Бергштранд	299 793,1±0,25
1950	Ганзен и Бол	299 789,3±0,4
1951	Аслаксон	299 794,2±1,4
1952	Фрум	299 792,6±0,7

Таблица III

Результаты критического анализа опытных данных о скорости света в вакууме

Год	Автор	c (км/сек)
1929	Бердж	299 796±4
1934	Бердж	299 776±4
1941	Бердж	299 776±4
1944	Дорсей	299 773±10
1948	Дюмонд и Коген	299 776±4
1951	Дюмонд и Коген ¹	299 790,2±0,9
1951	Бирдин и Ваттс ²	299 790,0±0,7
1951	Эссен ³	299 790,2
1951	Стилле ⁴	299 790
1951	Аслаксон ¹⁵	299 792,2

значительно больше указываемых ими вероятных ошибок. Пожалуй, это один из самых разительных примеров трудности и несовершенства методов оценки возможной погрешности измерений, показывающий, с какой осторожностью следует подходить к результатам такого рода оценок. Возвращаясь к таблице III, отметим, что авторы всех новейших сводок¹⁻⁴ согласно приходят к значению

$$c = 299\,790 \text{ км/сек.}$$

Исключение представляет значение, предложенное Аслаксоном¹⁵.

Суть в том, что Аслаксон счёл опровергнутыми все данные, полученные до 1941 г. и, кроме того, учёл значение, полученное им самим в 1951 г. и не учтённое в других сводках.

Поскольку данные Фрума, также не учтённые в опубликованных сводках, значительно лучше согласуются со значением, указанным Аслаксоном, представляется вероятным, что последнее ближе к действительности.

В заключение напомним, что измерения Бергштранда, Аслаксона и Фрума относятся к распространению электромагнитных волн в воздухе и полученные ими цифры отягчены погрешностями определения показателей преломления воздуха. Результаты же Эссена и Ганзена и Бола свободны от этих погрешностей, ибо измерения велись непосредственно в вакууме.

Г. Розенберг

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. W. M. Du Mond and E. R. Cohen, Phys. Rev. 82, 555 (1951); УФН 45, вып. 3, 458 (1951).
2. J. A. Bearden and H. M. Watts, Phys. Rev. 81, 73 (1951).
3. L. Essen, Nature 167, № 4242, 258 (1951).
4. U. Stille, Phys. Blätter 7, № 6, 260 (1951).
5. F. A. Vick, Sc. Progress 39, № 153, 74 (1951).
6. Atomes № 57, 426 (1950).
7. Wireless Eng. 28, № 331, 99 (1951).
8. Electronic Engin. 22, № 274, 524 (1950).
9. Korolus, Zeits. Naturforsch. 6a, № 7, 411 (1951).
10. L. Essen, Sc. Progress 40, № 157, 54 (1952).
11. J. F. Mulligan, Am. J. Phys. 20, № 3, 165 (1952).
12. Г. Розенберг, УФН 43, вып. 3, 485 (1950).
13. Birdg, Rep. Progr. Phys. 8, 90 (1941).
14. Bol, Phys. Rev. 80, 298 (1950).
15. C. J. Aslakson, Trans. Amer. Geophys. Un. 32, № 6, 813 (1951); Nature 163, 505 (1951).
16. L. Essen, Nature 165, 582 (1950); Proc. Roy. Soc. 204A, 260 (1950).
17. C. J. Aslakson, Trans. Amer. Geophys. Un. 30, 475 (1949); Nature 164, 711 (1941).
18. R. A. Houston, Proc. Roy. Soc. Edinburg 63A, 95 (1949); Nature 165, 582 (1950).
19. McKinley, J. Roy. Astr. Soc. Canada 44, 89 (1950).
20. M. R. Cleland and P. S. Jastram, Phys. Rev. 84, № 2, 271 (1951); УФН 46, вып. 3, 418 (1952).
21. D. Luckey and J. W. Wiel, Phys. Rev. 85, 1060 (1952); УФН 48, вып. 1, 145 (1952).
22. См., например, Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1947.
23. K. D. Froom, Nature, 169, № 4290, 107 (1952).
24. D. H. Ronk и др., Phys. Rev. 86, № 5, 799 (1952).
25. A. H. Nethercot и др., Phys. Rev. 86, № 5, 798 (1952).
26. E. Bergstrand, Arkiv för. Fys. 3, № 4—5, 479 (1952).